



APLICATIVO PARA O CÁLCULO DO FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DE COBERTAS ESPECIAIS

João Pereira de Brito Filho

Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Eletrônica e Sistemas – Av. Acadêmico Hélio Ramos, SN – Cidade Universitária - 50670-901 – Recife – PE – Brasil - jbrito@npd.ufpe.br

***Resumo.** Este artigo apresenta os resultados de um projeto desenvolvido para uma empresa nacional que fabrica um revestimento para ser aplicado em cobertas especiais com a finalidade de reduzir o fluxo de calor para o interior do ambiente. O objetivo do projeto foi a elaboração de um aplicativo para Windows que possibilitasse o cálculo do fluxo de calor que atravessa a cobertura de galpões, as temperaturas de suas faces e a temperatura interna do recinto para diversas condições climáticas (todos os meses do ano), localidades (todas as capitais do Brasil) e 12 (doze) tipos de cobertas. Para a elaboração do aplicativo em Delphi, foi proposto um modelo matemático que descreve os fenômenos físicos envolvidos na transferência de calor. Com os resultados das simulações, é possível se avaliar a carga térmica dos recintos para diferentes situações de interesse.*

Palavras-chave: fluxo de calor, cobertas leves, condução, convecção, radiação.

1. INTRODUÇÃO

Cobertas leves são típicas nas aplicações em galpões industriais, onde a área de sua superfície é grande quando comparada com a área da superfície da envoltória.

Existe no mercado, uma série de alternativas de isolamento térmico para estas situações, todas elas, no entanto, enquadradas na categoria de isolamento de massa.

Uma empresa americana desenvolveu um produto para revestimento, que se contrapõe ao tradicional método de isolamento térmico. Trata-se da aplicação na superfície da cobertura voltada para o sol de uma fina camada de produto com de elevada refletividade e emissividade. No país, quem detém a tecnologia de fabricação de um produto similar – o **Maxtherm** –, é a EMC do Brasil, com sede em São Paulo.

A utilização desse tipo de isolamento térmico apresenta uma série de vantagens, quando comparado com as soluções convencionais baseadas em isolamento de massa, dentre elas as seguintes: não se deteriora com a radiação solar, não requer manutenção exaustiva (apenas uma lavagem com hidrojateamento) e tem uma garantia de 10 anos.

Para demonstrar a eficiência do **Maxtherm**, a EMC do Brasil e o SEBRAE contrataram uma consultoria para desenvolver um aplicativo para o ambiente Windows que quantificasse o benefício (redução da temperatura interna) que o cliente terá se revestir a cobertura de seu estabelecimento com o **Maxtherm**. Com base em informações quantitativas extraídas das simulações, o cliente poderá então estimar o ganho financeiro proveniente da compra do **Maxtherm**, principalmente no que se refere à redução do consumo de energia elétrica no sistema de ar condicionado ou ventilação.

2. MODELO PROPOSTO

2.1. Descrição

A Fig.(1) mostra o modelo físico proposto para o cálculo do fluxo de calor através da cobertura e da temperatura interna (Brito e Fraidenraich, 1999).

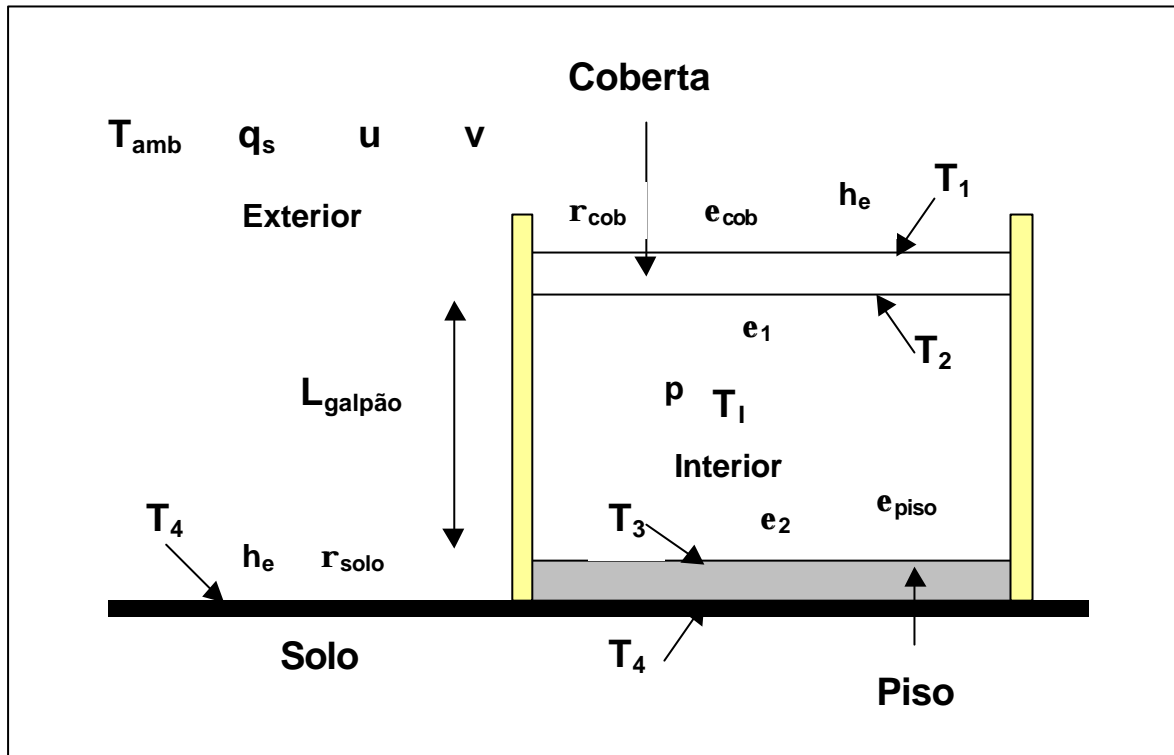


Figura 1. Modelo físico adotado

Os parâmetros que caracterizam as condições atmosféricas são: a temperatura ambiente T_{amb} , a radiação solar q_s , a umidade relativa do ar u e a velocidade dos ventos v .

Por outro lado, a cobertura, o piso interno e o solo ao redor do galpão são caracterizados pelos parâmetros e propriedades indicadas nas Figs. (2) a (4), respectivamente. Nestas figuras, K representa a condutividade térmica do material, L a sua espessura, e o coeficiente de emissividade e r a refletividade.

K_1, L_1, e_{cob} e r_{cob}	Camada 1
K_2 e L_2	Camada 2
K_3, L_3 e e_i	Camada 3

Figura 2. Parâmetros e propriedades da cobertura

$K_{\text{piso}}, L_{\text{piso}} \text{ e } e_{\text{piso}}$

Figura 3. Parâmetros e propriedades do piso.

$e_{\text{solo}} \text{ e } r_{\text{solo}}$

Figura 4. Propriedades do solo ao redor do galpão.

O galpão é caracterizado pela altura do pé direito $L_{\text{galpão}}$ e a produção interna de calor p . Por outro lado, a localidade (cidade) onde se encontra instalado o galpão é definida pela sua latitude l e longitude g , enquanto que a época do ano (dia típico de mês) e a hora do dia são explicitados pela declinação solar d e a hora solar w .

A cobertura poderá ser de um dos materiais listados na Tab. (1).

Tabela 1. Tipos de cobertas analisadas

	Tipo		Tipo
1	Aço galvanizado	7	Concreto
2	Alumínio	8	Aço galvanizado, poliuretano e aço galvanizado
3	Aço galvanizado e lã de vidro	9	Alumínio, lã de vidro e alumínio
4	Alumínio e lã de vidro	10	Aço galvanizado, lã de vidro e aço galvanizado
5	Alumínio, poliuretano e alumínio	11	Fibrocimento e lã de vidro
6	Fibrocimento	12	Concreto e lã de vidro

Além destes doze tipos, foram consideradas outras doze configurações, obtidas aplicando-se o revestimento **Maxtherm**, fabricado e distribuído pela empresa EMC do Brasil Ltda, sobre a face da cobertura voltada para o exterior, perfazendo um total, portanto, de 24 situações.

As simulações podem ser realizadas para um dia típico de cada um dos 12 meses do ano, prática usual em projetos de sistemas solares.

2.2. Mecanismos de Transferência de Calor

Antes do nascer do Sol, as temperaturas horárias da cobertura, do piso, do solo e do ar no interior do galpão são assumidas como sendo a temperatura do ambiente exterior T_{amb} . Logo após o instante em que o Sol nasce, inicia-se o processo de transferência de calor com a elevação da temperatura externa da cobertura T_1 devido à incidência da radiação solar q_s .

Deste instante em diante, até a hora em que o Sol se põe, o que se verifica é um processo de transferência de calor (1) da cobertura para o meio ambiente exterior (perda) por convecção, caracterizado pelo coeficiente h_e e radiação, caracterizado pela refletividade r_{cob} e emissividade e_{cob} e (2) condução através da cobertura (ganho), que passa a assumir a temperatura T_2 , processo este caracterizado pela sua resistência térmica equivalente R (soma das contribuições L/K de cada camada que a compõe).

Ao mesmo tempo em que a face externa da cobertura aquece, a temperatura do solo ao redor do galpão T_4 aumenta, dando origem a um complexo processo de transferência de calor por convecção, caracterizado pelo coeficiente h_e ; por radiação, caracterizado pela refletividade r_{solo} e emissividade

e_{solo} ; e por evaporação, caracterizado pela natureza da superfície do solo (com ou sem vegetação, úmido, seco ou árido) com a atmosfera.

No interior do galpão, os mecanismos de transferência de calor são os seguintes: (1) radiação entre a face interna da cobertura e o piso, caracterizada por suas respectivas emissividades e_1 e e_2 , (2) convecção e/ou condução entre a face interna da cobertura e o ar do interior e deste para o piso - o sentido do fluxo de calor transferido por convecção depende dos valores relativos das temperaturas do ar e das superfícies, h_1 e h_2 e (3) condução do piso para o solo, caracterizada pela sua condutividade térmica K_{piso} e espessura L_{piso} .

A radiação solar foi calculada com a metodologia apresentada por Fraidenraich e Lyra (1995) e os coeficientes de transferência de calor por convecção com as correlações detalhadas em Baehr e Stephan (1994).

2.3 Hipóteses

Na elaboração do modelo, foram utilizadas as seguintes hipóteses:

- O fluxo de calor através da cobertura é unidimensional;
- Por se tratar de um estudo comparativo entre diversos tipos de cobertas, não se levam em conta o fluxo de calor pelas laterais da construção (parede, portas e janelas) e troca com outras edificações vizinhas;
- Todas as propriedades termofísicas são assumidas constantes;
- A época do ano é caracterizada pelas condições meteorológicas de um dia típico de cada mês.

3. CÁLCULO NUMÉRICO

Para fins de verificação e análise de convergência, todas as equações e sistemas de equações do modelo foram calculadas através das instruções *Find* e *Given*, respectivamente, do *software Mathcad*, versão 6.0, da empresa **MathSoft, Inc.** Na implementação da solução em *Delphi*, foram utilizados os seguintes procedimentos numéricos:

- Para os sistemas de equações lineares: Método de eliminação de Gauss (Kreyszig, 1993);
- Para os sistemas de equações não lineares: Método de Newton-Raphson (Kreyszig, 1993).

Em todo o procedimento numérico implementado em *Delphi*, mereceu especial atenção a escolha correta dos valores iniciais e a velocidade de convergência dos algoritmos.

A Tab. (2) mostra as propriedades termofísicas usadas nas simulações.

Tabela 2. Propriedades termofísicas

Material	Refletividade	Emissividade	Cond. Térmica	Espessura
	r [-]	e [-]	K [W/mK]	L [m]
Aço galvanizado	0,35	0,276	45	0,0005
Alumínio	0,35	0,216	206	0,0005
Concreto ⁽¹⁾	0,2	0,4	0,9	0,05
Concreto ⁽²⁾	-	0,6	0,4	0,15
Fibrocimento	0,2	0,4	0,4	0,008
Lã de vidro	x	0,8	0,038	0,05
Maxtherm	0,9	0,95	0,00345	0,00003
Poliuretano	x	x	0,0186	0,025
Solo	0,6	0,8	-	-

Obs.: (1) utilizado como cobertura e (2) como piso

4. RESULTADOS

O software é composto por 4 telas principais e ainda telas para digitação da senha e cadastro do cliente. As Figs. (5) e (6) mostram as telas de Entrada de Dados e Resultados, respectivamente, para a versão do aplicativo que tem a temperatura interna como variável independente.

Figura 5. Tela de Entrada de Dados

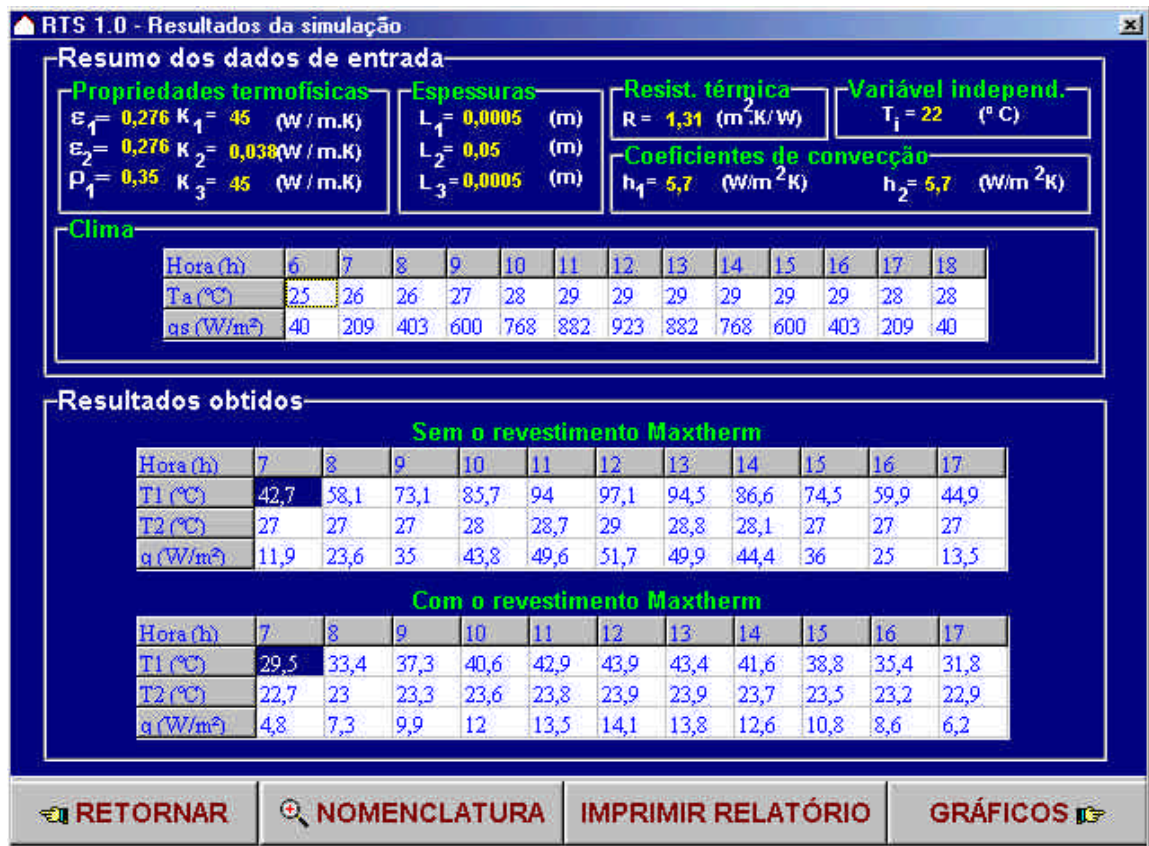


Figura 6. Tela com os resultados da simulação

O software permite apresentar os resultados das simulações impressos tanto na forma de tabela (Tab.(3)), quanto gráfica (Fig. (7)).

Tabela 3. Resultados das simulações

<http://www.emcdobrasil.com.br>

**EMC do Brasil
Roof Thermal Simulator**

Dados de entrada

Cliente: Creta Consultores Associados Ltda
 Tipo da cobertura: Aço galvanizado, lã de vidro e aço galvanizado
 Cidade: Aracaju
 Mês: Janeiro

Geração de calor (W/m^2): 0
 Espessura (m): 0,0005 0,05 0,0005
 Condutividade térmica (W/mK): 45 0,038 45
 Emissividade (-): 0,276 0,276 (com Maxtherm, substituir 0,276 por 0,9)
 Refletividade (-): 0,35 (com Maxtherm, substituir por 0,8)
 Resistência térmica (m^2K/W): 1,315 (com Maxtherm, adicionar 0,096 m^2K/W)

Resultados

Fluxo de calor através da cobertura (W/m^2):

Hora do dia:	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Sem Maxtherm:	2,7	5,3	7,9	10,1	11,7	12,2	11,7	10,2	7,9	5,3	2,7
Com Maxtherm:	0,5	0,9	1,4	1,8	2,1	2,2	2,1	1,8	1,4	0,9	0,5
Redução (%):	82,1	82,2	82,2	82,3	82,4	82,4	82,4	82,4	82,3	82,3	82,2

Temperatura interna ($^{\circ}C$):

Hora do dia:	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Sem Maxtherm:	28,2	30,8	33,3	35,6	37,1	37,8	37,7	36,7	35,0	32,9	30,7
Com Maxtherm:	27,1	28,8	30,4	31,8	32,9	33,4	33,4	32,9	32,1	30,9	29,6
Redução (%):	3,7	6,5	8,8	10,5	11,4	11,7	11,2	10,1	8,4	6,1	3,4

Observações

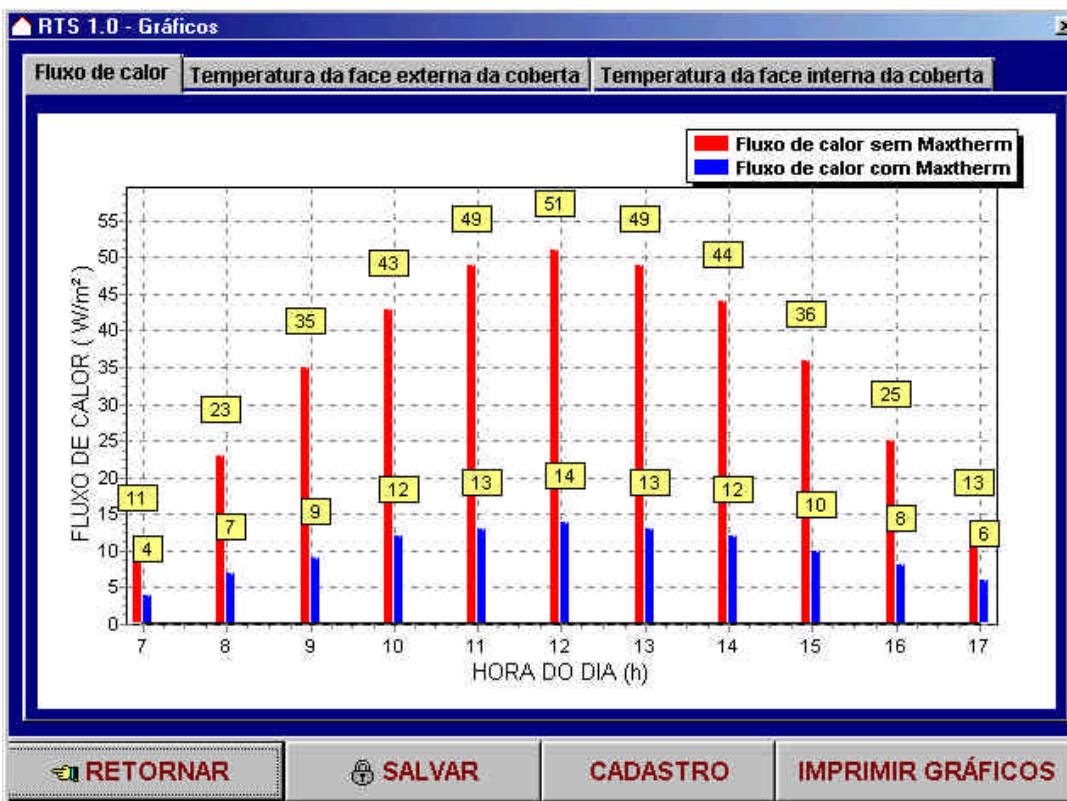


Figura 7. Representação gráfica dos resultados

5. CONCLUSÕES

Com o aplicativo desenvolvido, é possível se avaliar o desempenho térmico (fluxo de calor, carga térmica e temperaturas interna do recinto e temperaturas das faces interna e externa) de 12 tipos diferentes de cobertas leves comerciais.

6. REFERÊNCIAS

- Baehr, H. D. und Stephan, K., 1994, “Wärme und Stoffübertragung”, Springer Verlag, Berlin, pp. 383-396.
- Brito, J., Fraidenaich, N., “Cálculo do fluxo de calor através de cobertas típicas de galpões industriais”. Relatório Técnico de Projeto, FADE/UFPE/SEBRAE, pp. 38.
- Fraidenaich, N. e Lyra, F., 1995, Energia Solar: Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermoeletrica e Fotovoltaica”, Editora Universitária, Recife, Primeira Edição, pp. 53-80.
- Kreyszig, E., 1993, “Advanced engineering mathematics”, John Wiley and Sons, Seventh Edition, pp. 972-977.

SOFTWARE FOR CALCULATION OF HEAT FLUX THROUGH SPECIALS ROOFS

João Pereira de Brito Filho

Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Eletrônica e Sistemas – Av. Acadêmico Hélio Ramos, SN – Cidade Universitária - 50670-901 – Recife – PE - Brasil jbrito@npd.ufpe.br

Abstract. This work presents the results of a project developed for a Brazilian manufacturer of coatings for special roofs. The coating reduces the heat flux to the interior of buildings. A software to evaluate the heat flux through the roof of simple buildings (big sheds) was developed. The

simulations were carried out for different climate conditions (months of the year), places (Brazilian Federal State capitals) and 12 different roofs. A mathematical model that describes the involved physical phenomena of heat transfer was developed. The mathematical model was simulated for Windows using DELPHI. The results of the simulations enabled the evaluation of the heat loads for cooling, for different situations.

Key words: heat flux, specials roofs, conduction, convection, radiation.